

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МУРАХОВСЬКИЙ СЕРГІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 531.383

**АЛГОРИТМІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ГІРОТЕОДОЛІТІВ
НА ОБМЕЖЕНО РУХОМІЙ ОСНОВІ**

05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Лазарєв Юрій Федорович,

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”, доцент кафедри приладів і систем
орієнтації та навігації

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук

Черняк Сергій Іванович,

Казенне підприємство спеціального
приладобудування «Арсенал», головний
конструктор напрямку

кандидат технічних наук

Головач Сергій Володимирович,

Приватне акціонерне товариство «Елміз»,
головний фахівець з розробки гіроскопів та
навігаційних систем

Захист відбудеться «21» червня 2019 р. о 14 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 17 травня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., доцент



Ю. В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасних засобів наземної орієнтації потребує використання у своєму складі гіроскопічних компасів середньої та високої точності.

Високі вимоги до гірокомпасів та гіротеодолітів, що використовуються в системах наземної орієнтації, обумовлюють необхідність роботи приладу в умовах поступальної та кутової вібрації.

Значні дослідження поведінки гірокомпасу в умовах вібрації проводились у 70-90-х роках ХХ ст. Сучасні прилади мають значні відмінності, внаслідок застосування нових технологій в галузі електроніки та обробки інформації.

Тому в наш час актуальним є розробка нових та вдосконалення існуючих методів підвищення точності наземних гірокомпасів. Вирішення задачі підвищення точності можливе як конструктивними методами, так і за допомогою засобів математичної обробки інформації, яка видається приладом. Можливість використання алгоритмічних засобів підвищення точності дозволяє значно зменшити витрати на розробку та виготовлення гірокомпасу, який здатний працювати в умовах збурень основи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації в рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring» (№ ДР 0115U000318) та переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (постанова КМ України № 942 від 07.09.2011 р. зі змінами внесеними згідно з Постановами КМ № 970 від 24.10.2012, № 741 від 23.09.2015, № 556 від 23.08.2016): Нові апаратні рішення для перспективних засобів обчислювальної техніки, інформаційних та комунікаційних технологій, Інтелектуальні інформаційні та інформаційно-аналітичні технології. Робота виконувалась відповідно до задач основного науково-технічного напрямку досліджень кафедри приладів і систем орієнтації і навігації.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності гіротеодоліта, що встановлюється на основі, яка здійснює поступальний рух, шляхом застосування алгоритмічних засобів обробки його вихідної інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні наукові і прикладні задачі:

- на основі аналізу проблеми визначити фактори, що впливають на точність гіротеодоліта, встановленого на обмежено рухомій основі
- розробити математичну модель наземного маятникового гіротеодоліта, яка враховує поступальну вібрацію основи, а також особливості його роботи в компенсаційному режимі;
- визначити похибки гіротеодоліта, що виникають внаслідок дії поступальної вібрації;
- обґрунтувати наукові методи, що застосовуються для вирішення задачі підвищення точності гіротеодоліта під дією поступальної вібрації;

- розробити математичну модель алгоритмічної компенсації похибок гіротеодоліта;
- розробити комплекс методів, що призначені для визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта;
- експериментально дослідити розроблені методи на діючих приладах.

Об'єктом дослідження є гіротеодоліт, який працює в умовах зовнішніх збурень.

Предметом дослідження є вібраційна похибка гіротеодоліта та методи її компенсації.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних і експериментальних досліджень використовувались: метод кінетостатики, рівняння Лагранжа 2-го роду, методи теорії автоматичного керування, методи аналізу частотних характеристик, методи прикладної теорії стаціонарних випадкових функцій, методи кореляційного та спектрального аналізу, перетворення Фур'є та Лапласа, методи синтезу спостережних пристроїв та ідентифікаторів стану, методи оптимальної фільтрації, методи математичного моделювання динамічних систем, методи обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта відносно головної осі – кута та кутової швидкості на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора.

2. Вперше розроблено інформаційну модель гіротеодоліта, в якій враховано як основні динамічні властивості приладу в умовах вібраційного збурення, так і внутрішні джерела інформації, які можуть бути використані для підвищення точності.

3. Розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу в азимуті на основі ідентифікатору стану, визначено необхідні власні частоти на основі аналізу частотних характеристик системи.

4. Удосконалено метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки за рахунок використання внутрішніх джерел інформації приладу, та показано ефективність розроблених методів при дії на гіротеодоліт поступальної вібрації, як детермінованої так і випадкової.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що в ній розроблено алгоритми компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту на обмежено рухомій основі за додатковою інформацією про рух чутливого елементу; розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для компенсації вібраційної похибки, статистичного аналізу похибки при дії випадкової вібрації; розроблено рекомендації по вибору параметрів гіротеодоліта та діапазону можливих амплітуд і частот поступальної вібрації основи.

Розроблені методи визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту захищено патентами України на корисну модель.

Метод алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту та метод оцінювання кутової швидкості чутливого елементу використані на етапі лабораторних досліджень в КП СПБ “Арсенал” та можуть знайти застосування при

створенні перспективних високоточних гіротеодолітів. Розроблені методи та результати теоретичних досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для розробки і покращення систем оцінки параметрів руху чутливих елементів гіроскопічних приладів.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист: проаналізовано залежність вібраційної похибки від амплітуди та частоти вібрації, виконано моделювання динаміки чутливого елементу гірокомпаса, розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану, розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора, проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки, проаналізовано вплив випадкової вібрації на похибку гіротеодоліта, отримано залежності похибки від зовнішніх та внутрішніх факторів, виконано синтез фільтра Калмана, запропоновано вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу, виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гіротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: [1, 12] – виконано моделювання динаміки гіротеодоліта в умовах поступальної гармонічної вібрації основи, проаналізовано частотні характеристики вібраційної похибки, [2, 7] – розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елементу гіротеодоліта в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану, запропоновано вибір коефіцієнтів спостережування на основі аналізу частотних характеристик, [5, 17] – виконано синтез фільтра Калмана, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елементу, [6] – виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гіротеодоліту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки, [8, 18] – запропоновано метод визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу, вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту, [9] – проведено моделювання динаміки наземного маятникового гірокомпаса компенсаційного типу при поступальній вібрації основи, [15] – запропоновано метод визначення параметрів кутового руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині.

Апробація результатів дисертації. Наукові результати дисертації обговорювались на 12 конференціях, серед них міжнародні науково-технічні конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м. Київ, 2006-2015 рр), міжнародні науково-технічні конференції «Сучасні технології в системах керування і озброєнь» (м. Ковров, Російська Федерація, 2012 р.), IV всеукраїнська науково-

практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці» (м. Луганськ, 2010 р.)

Публікації. По темі дисертації опубліковано 19 робіт, в тому числі 6 статей в наукових фахових виданнях, 11 тез доповідей в збірках матеріалів конференцій, 2 патенті України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, огляд стану проблеми і постановку задачі досліджень, 4 розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел із 102 найменувань та 3 Додатків. Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках, основний зміст роботи становить 152 сторінки друкованого тексту, в тому числі 53 рисунки і 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** виконано обґрунтування вибору теми дослідження, актуальності розробки методів та засобів підвищення точності гіротеодолітів, що використовуються для визначення азимутів при впливі зовнішніх вібраційних збурень. Визначається зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, формулюється мета і задачі дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їх практичне значення, наводяться дані про апробацію та публікації результатів роботи, висвітлено особисту участь здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану розвитку автономних приладів наземного орієнтування та методів підвищення їх точності, обґрунтовано застосування алгоритмічних методів для зменшення впливу вібраційної похибки.

Особливістю наземних засобів азимутального орієнтування, побудованих на гіроскопічних вимірювачах, є висока точність визначення напрямку географічного меридіану за відносно короткий проміжок часу незалежно від природних умов, тобто автономно.

Зважаючи на широке використання сучасних методів орієнтування на основі супутникових навігаційних систем, особливо велике значення набуває використання гіротеодолітів у підземних роботах та при роботі в складі військової техніки, тобто у випадках недоступності зовнішніх джерел інформації. Вдосконалення технології видобутку корисних копалин, збільшення розмірів шахтних полів і глибини розробки вимагають підвищення точності і надійності побудови планової підземної маркшейдерської опорної мережі.

Широке коло застосування приладів наземного орієнтування передбачає різні вимоги до точності та часу визначення азимутів. В деяких випадках немає необхідності у високоточних вимірюваннях, але інформація потрібна за короткий проміжок часу, тому виробники часто поєднують в одному приладі декілька режимів вимірювання, з можливістю вибору оптимального з точки зору швидкодії та точності.

У більшості випадків гіротеодолітом або наземним гірокомпасом вважається геодезичний гіроскопічний прилад, що призначений для визначення азимутів напрямків на земній поверхні. Такий прилад не обов'язково має в своєму складі безпосередньо кутовимірювальну теодолітну частину, а досить часто визначає азимут нормалі до контрольної оптичної поверхні. При цьому в класичному

розумінні гіротеодоліт є триступеневим маятниковим гірокомпасом або двоступеневим гірокомпасом з ротором, що швидко обертається, і головна вісь якого розташована горизонтально. В останні роки для наземного орієнтування досить часто використовуються інерціальні системи різного типу, які працюють в режимі гірокомпасування, як правило, аналітичного. В якості гіроскопічних датчиків в таких приладах можуть бути використані лазерні, волоконно-оптичні, динамічно-налагоджувані, твердотільні гіроскопи. У порівнянні з класичними гіротеодолітами такі системи мають помітно меншу точність, у кращих зразків на основі лазерних гіроскопів – 5-10 кутові хвилини. Для досягнення відповідної точності визначення азимуту гіроскопи повинні мати кутову швидкість дрейфу не більше $0,005^\circ/\text{годину}$, а акселерометри – зміщення нуля не більше $10^{-4} g$.

Широке використання супутникових навігаційних систем для наземного орієнтування об'єктів обмежується слабкою захищеністю від зовнішніх перешкод, як природних так і штучних. В той же час гіроскопічні вимірювачі є автономними та захищеними від перешкод, однак мають методичні та інструментальні дрейфи.

Виходячи з відомих математичних моделей гіротеодолітів, похибки таких приладів можна розділити на методичні та інструментальні. До основних методичних похибок відносяться:

1) похибка, що виникає від неточного горизонтування приладу. Цю похибку зменшують за допомогою спеціальних пристроїв, при цьому час, що необхідний для горизонтування, додається до загального часу вимірювання. В сучасних конструкціях точність горизонтування забезпечують на рівні $30''$;

2) похибка від не горизонтальності головної осі гіроскопа, що призводить до змінення напрямного моменту внаслідок наявності множника $\cos\beta$;

3) карданова похибка, яка виникає внаслідок вимірювання вихідного кута α в площині, яка не співпадає з площиною горизонту;

4) вібраційна похибка, яка є проявом випрямного ефекту і виникає при роботі поруч з приладом обладнання, що створює вібрації;

Інструментальні похибки визначаються недосконалістю конструкції гіротеодоліта, до основних можна віднести:

1) похибка від моменту сил сухого тертя; виникає внаслідок тертя елементів конструкції, зокрема токопідводів;

2) похибка від технологічної неточності виготовлення елементів підвісу; для магнітного підвісу, наприклад, характерна похибка, що виникає внаслідок анізотропії феромагнітного матеріалу, з якого виготовлено якір на чутливому елементі;

3) нестабільність масштабного коефіцієнту приладу, що виникає при змінюванні факторів навколишнього середовища, наприклад, температури повітря або зовнішніх магнітних полів.

4) для приладів, які мають в своєму складі теодолітну частину характерна також колімаційна похибка, що виникає внаслідок не перпендикулярності осі візювання та осі обертання зорової труби.

Більшість зазначених методичних та інструментальних похибок мають відносно невеликі абсолютні значення в межах одиниць кутових хвилин, крім того існує

значна кількість робіт, які присвячені питанням їх зменшення. Окремо слід виділити серед них вібраційну похибку, яка може навіть за невеликих амплітуд вібрацій сягати десятків градусів.

Аналіз публікацій за темою дисертації показав, що розробники сучасних гіроскопічних систем, призначених для визначення азимутів пропонують різні підходи до підвищення їх точності. Але, в більшості випадків, основна увага приділяється компенсації інструментальних похибок гіртеодолітів, тобто вдосконаленню їх конструкцій. В наявних публікаціях останнього десятиліття недостатньо уваги приділялось саме вібраційній похибці, незважаючи на сучасні вимоги, що висуваються до засобів наземного орієнтування. Тому наявні дослідження не дозволяють розв'язати актуальну задачу зменшення впливу зовнішньої вібрації на точність гіртеодолітів.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, та обрано відповідні методи досліджень.

В другому розділі розглянуто математичну модель гіртеодоліту з врахуванням зовнішніх вібраційних збурень. В якості базової розрахункової моделі прийнято гіртеодоліт з точкою підвісу, нерухомою відносно його корпусу. При цьому фізична сутність похибок, що виникають внаслідок вібрації основи не зміниться, відповідно методи алгоритмічної компенсації можуть бути застосовані і для приладів з загальним випадком підвісу чутливого елементу.

Якщо знехтувати моментами сил інерції обертального прискорення, прецесійні рівняння руху чутливого елементу гіртеодоліта можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} H(\dot{\beta}\cos\beta + U_{Zc}\cos\alpha + U_{Xc}\sin\alpha)\cos\beta = & -K_{KC}\alpha - F_{KC}\dot{\alpha} - f_{\alpha}\dot{\alpha} + \\ & + m l [(w_{Xc} - g_{Xc})(\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma\sin\beta) + \\ & + (w_{Zc} - g_{Zc})(-\sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H[(\dot{\alpha} + U_{Yc})\cos\beta - (U_{Xc}\cos\alpha - U_{Zc}\sin\alpha)\sin\beta] = & -f_{\beta}\dot{\beta} + \\ & + m l [-(w_{Xc} - g_{Xc})\cos\alpha\cos\beta - (w_{Yc} - g_{Yc})\sin\beta + (w_{Zc} - g_{Zc})\sin\alpha\cos\beta]\cos\gamma \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} J_X\ddot{\gamma} + f_{\gamma}\dot{\gamma} = & m l [(w_{Xc} - g_{Xc})(\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma\sin\beta) - \\ & - (w_{Yc} - g_{Yc})\cos\beta\sin\gamma + (w_{Zc} - g_{Zc})(\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma\sin\beta)] \end{aligned} \quad (3)$$

В рівняннях (1)...(15) позначено: m – маса чутливого елементу, H – кінетичний момент гіроскопа; K_{KC} – коефіцієнт компенсаційного зв'язку; f_{α} , f_{β} , f_{γ} – коефіцієнти в'язкого тертя; F_{KC} – коефіцієнт демпфірування, пропорційний коефіцієнту компенсаційного зв'язку; w_{Xc} , w_{Yc} , w_{Zc} – проекції вектора \vec{w} прискорення точки підвісу на осі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$; g_{Xc} , g_{Yc} , g_{Zc} – проекції вектора \vec{g} прискорення сили тяжіння на осі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$; U_{Xc} , U_{Yc} , U_{Zc} – проекції вектора \vec{U} абсолютної кутової швидкості основи на осі зв'язаної системи координат $X_C Y_C Z_C$.

Проекції вектора кутової швидкості \vec{U} визначаються виразами:

$$\begin{cases} U_{Xc} = \dot{\varphi} + (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \sin \theta + \omega_3 \cos \phi_g \cos \theta \cos \varphi \\ U_{Yc} = (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \cos \theta \cos \varphi + \\ + \omega_3 \cos \phi_g (\sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) + \dot{\theta} \sin \varphi \\ U_{Zc} = -(\dot{\psi} + \omega_3 \sin \phi_g) \cos \theta \sin \varphi + \\ + \omega_3 \cos \phi_g (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) + \dot{\theta} \cos \varphi \end{cases};$$

де ω_3 – кутова швидкість власного обертання Землі, ϕ_g – географічна широта місця встановлення приладу.

Проекції вектора прискорень $(\vec{w} - \vec{g})$ визначаються виразами:

$$\begin{cases} w_{Xc} - g_{Xc} = g[\sin \theta + (n_N \cos \psi - n_E \sin \psi) \cos \theta] \\ w_{Yc} - g_{Yc} = g[\cos \theta \cos \varphi + n_N (\sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) + \\ + n_E (\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta)] \\ w_{Zc} - g_{Zc} = g[-\cos \theta \sin \varphi + n_N (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) + \\ + n_E (\cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \sin \theta)] \end{cases};$$

де n_N , n_E – північна і східна складові перевантаження точки підвісу ГТ відповідно.

Отримана динамічна модель руху чутливого елемента ГТ складається з рівнянь по відповідним узагальненим координатам. В той же час сам об'єкт дослідження має в своєму складі додаткові елементи та системи, інформація з яких може бути використана для підвищення точності при вібраційних збуреннях основи. Тому доцільним є складання інформаційної моделі ГТ на обмежено рухомій основі, яка включатиме динамічні рівняння руху ЧЕ, зовнішні збурення, що діють на об'єкт дослідження, сигнали, які формуються в допоміжних системах керування, надлишкову інформацію, наявну в самому приладі.

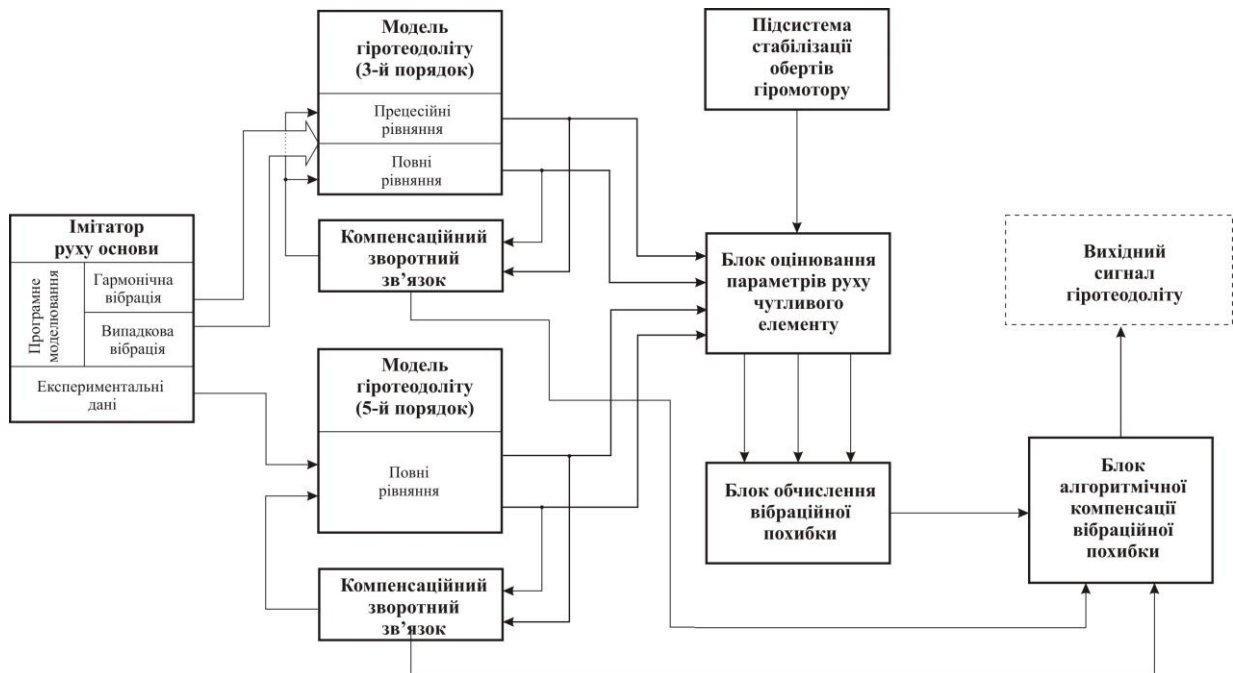


Рис.1. Інформаційна модель гіртеодоліта

Для аналізу точності гіртеодоліта за вібрації основи, доцільно використовувати частотні передатні функції, амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики, а також математичний апарат кореляційного та спектрального аналізу при випадкових вібраційних збуреннях. Оскільки вихідна система рівнянь, що описують динаміку ГТ, є нелінійною, то для використання відповідних методів дослідження частотних характеристик необхідно перетворити рівняння (1)...(3) в систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{\beta} + \omega_3 \cos \phi_g \sin \psi_0 + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 \cdot \alpha = \\ = \omega_{pr} [\gamma \cdot n_X(t) + \beta \cdot n_Z(t)] - k_{KC} \alpha - (p_{KC} + p_\alpha) \dot{\alpha}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} + \omega_3 \sin \phi_g - (\omega_{pr} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0) \beta = \\ = \omega_{pr} [n_X(t) - \alpha \cdot n_Z(t)] + p_\beta \dot{\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\ddot{\gamma} + 2\mu_\gamma \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma = \omega_\gamma^2 [n_Z(t) + \alpha \cdot n_X(t)] \quad (6)$$

де позначено:

$$\begin{aligned} \omega_{pr} = \frac{mgl}{H}; \quad \omega_\gamma = \sqrt{\frac{mgl}{J_X}}; \quad \mu_\gamma = \frac{f_\gamma}{2J_X}; \quad p_\alpha = \frac{f_\alpha}{H}; \quad p_\beta = \frac{f_\beta}{H}; \quad p_{KC} = \frac{F_{KC}}{H}; \\ n_X(t) = \cos(\varepsilon + \psi_0)n(t); \quad n_Z(t) = \sin(\varepsilon + \psi_0)n(t). \end{aligned}$$

Рівнянням (4)...(6) відповідають рівняння першого наближення, в яких не враховуються члени другого порядку мализни в правій частині:

$$\begin{cases} \dot{\beta} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0 \cdot \alpha = -k_{KC} \alpha - (p_{KC} + p_\alpha) \dot{\alpha} \\ \dot{\alpha} - (\omega_{pr} + \omega_3 \cos \phi_g \cos \psi_0) \beta = \omega_{pr} n_X(t) + p_\beta \dot{\beta} \end{cases}; \quad (7)$$

$$\ddot{\gamma} + 2\mu_\gamma \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma = \omega_\gamma^2 n_Z(t) \quad (8)$$

Підставляючи розв'язки рівнянь першого наближення до першого рівняння системи (7), після усереднення отримаємо:

$$\sin \langle \alpha \rangle = \frac{\omega_g n_m^2}{4\omega_3 \cos \phi_g} [N_\gamma(\omega) + N_\beta(\omega)] \sin 2(\varepsilon + \psi_0). \quad (9)$$

Отже, вібраційна похибка залежить від параметрів приладу: кінетичного моменту, маси та маятниковості ЧЕ; напрямку вібрації і положення головної осі гіроскопа відносно площини меридіану, амплітудно-частотних характеристик приладу, а також амплітуди і частоти перевантаження точки підвісу. Порівняно з відомими залежностями вібраційної похибки формула (9) містить кут початкового відхилення ЧЕ в азимуті ψ_0 .

За випадкової вібрації точки підвісу перевантаження точки $n(t)$ можна вважати стаціонарним випадковим процесом. Експериментальні дослідження доводять, що можна також вважати процес поступальної вібрації близьким до нормального, який повністю визначається математичним очікуванням $M[n(t)]$ і кореляційною функцією $K_n(\tau)$:

$$M[n(t)] = 0,$$

$$K_n(\tau) = \sigma_n^2 e^{-\mu_n |\tau|} \left(\cos \lambda_n \tau + \frac{\mu_n}{\lambda_n} \sin \lambda_n |\tau| \right), \quad (10)$$

де σ_n^2 – дисперсія амплітуди перевантаження, λ_n – переважна частота поступальної вібрації, μ_n – коефіцієнт кореляційної функції, що характеризує нерегулярність вібрації.

Математичне очікування $M[n(t)]$ обрано рівним нулю, виходячи з очевидного фізичного змісту вібраційного перевантаження. Кореляційній функції (10) відповідає спектральна щільність, що характеризує розподіл інтенсивності коливань за частотою:

$$S_n(\omega) = \frac{2\mu_n \sigma_n^2}{\pi} \frac{b_n^2}{\omega^4 + 2a_n \omega^2 + b_n^2}, \quad (11)$$

де $a_n = \mu_n^2 - \lambda_n^2$, $b_n^2 = \mu_n^2 + \lambda_n^2$.

Для визначення похибки гіротеодоліту в усталеному режимі при дії випадкової вібрації визначимо математичне очікування від першого рівняння системи (7):

$$M[\alpha(t)] = \frac{mgl}{H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa)} (M[\gamma(t) \cdot n_x(t)] + M[\beta(t) \cdot n_z(t)]).$$

Відтак, вібраційна похибка є пропорційною сумі кореляційних моментів, що визначають ступінь взаємозв'язку між проекціями перевантаження точки підвісу гіротеодоліту та коливаннями чутливого елемента по кутах β і γ :

$$M[\alpha(t)] = \frac{1}{2} \frac{mgl \cdot \sigma_n^2}{H\omega_3 \cos \varphi_g (1 + \kappa)} [N_\gamma + N_\beta] \sin 2(\varepsilon + \psi_0), \quad (12)$$

$$\text{де } N_\gamma = \frac{\omega_\gamma^2 (b_n^2 + \omega_\gamma^2 + 4\mu_n \mu_\gamma + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_\gamma^2 + 2\mu_n \mu_\gamma)^2 - 4\lambda_n^2 \omega_\gamma^2 (1 - \xi_\gamma^2)},$$

$$N_\beta = - \frac{2T_1 b_n^2 (\mu_n + \mu_{\alpha\beta}) + \omega_{\alpha\beta}^2 (\omega_{\alpha\beta}^2 + b_n^2 + 4\mu_n \mu_{\alpha\beta} + 2a_n)}{(b_n^2 + \omega_{\alpha\beta}^2 + 2\mu_n \mu_{\alpha\beta})^2 - 4\lambda_n^2 \omega_{\alpha\beta}^2 (1 - \xi_{\alpha\beta}^2)}.$$

Отже, математичне очікування вібраційної похибки гіротеодоліту при випадковій вібрації $M[\alpha(t)]$ залежатиме від багатьох факторів. По-перше, за аналогією з регулярною вібрацією, середнє значення залежатиме від напрямку поступальної випадкової вібрації, і буде сягати максимуму при $\varepsilon + \psi_0 = 45^\circ$. По-друге, математичне очікування $M[\alpha(t)]$ залежатиме від дисперсії амплітуди перевантаження σ_n^2 аналогічно квадрату амплітуди регулярної вібрації. Нарешті, воно буде також залежати від переважної частоти та степеня нерегулярності вхідної випадкової вібрації, а також від характеристик гіротеодоліту, як динамічної системи. Слід зауважити, що при розрахунку похибки на практиці в більшості випадків можна знехтувати складовою N_β у порівнянні з N_γ , оскільки вони відрізняються на два порядки, при переважній частоті випадкової вібрації λ_n більше 1 Гц.

Виходячи з аналізу формул (9) і (12) стає очевидним, що для підвищення точності необхідно збільшувати кінетичний момент гіроскопа H , а також коефіцієнт передачі компенсаційного зворотного зв'язку. Збільшення H буде приводити до збільшення маси та габаритів ЧЕ та приладу в цілому, що значно ускладнює конструкцію, а, з іншого боку, наявність в чисельнику тих самих формул маси чутливого елементу m означає, що досягти суттєвого зменшення похибки таким шляхом неможливо. Крім того при проектуванні гіротеодолітів як правило використовуються стандартні гіромотори з кінетичними моментами 0.1 Н м с, 0.4 Н м с та 1 Н м с. Збільшення коефіцієнту передачі зворотного зв'язку обмежується, в основному, крутизною характеристики датчика моменту, який використовується для створення компенсуючого моменту, тобто також необхідно збільшувати габарити і масу приладу.

З аналізу літературних джерел відомо, що існують інші форми подання вібраційної похибки, які є більш зручними для реалізації методів компенсації похибок:

$$\sin\langle\alpha\rangle = \frac{\langle\dot{\alpha}\gamma\rangle}{\omega_3 \cos\varphi_g}, \quad (13)$$

$$\sin\langle\alpha\rangle = \frac{-\langle\alpha\dot{\gamma}\rangle}{\omega_3 \cos\varphi_g}. \quad (14)$$

Тобто, якщо відомі значення $\dot{\alpha}$ і γ , або $\dot{\gamma}$ та α можливо обчислити вібраційну похибку за відповідною формулою та врахувати її у вихідному сигналі приладу як поправку. Величина кутового відхилення ЧЕ від площини меридіану як правило є відомою, оскільки кут α безпосередньо вимірюється за допомогою оптичного датчика, що встановлюється на слідкуючому корпусі приладу. Кутову швидкість обертання ЧЕ в азимуті $\dot{\alpha}$ можна визначити за відомим кутом α . Знаходження інших необхідних параметрів руху чутливого елементу є набагато більш складною задачею, оскільки рух чутливого елементу навколо головної осі гіроскопічно не пов'язані з коливаннями по кутах α і β .

Змодельовано алгоритмічну компенсацію вібраційної похибки з використанням програмної моделі, розробленої на основі інформаційної моделі ГТ (рис.1). Для спрощення аналізу та інтерпретації результатів моделювання вважатимемо відхилення нуля відлікової системи приладу $\psi_0 = 0$. В такому випадку кут α визначатиме похибку вимірювання азимуту. Кут нахилу лінії вібрації до площини меридіану оберемо $\varepsilon = 45^\circ$, тобто візьмемо максимальне значення функції $\sin 2(\varepsilon + \psi_0)$. Окрім вказаних параметрів приладу задамо в моделі $H = 0.4$ Н м с, $J_z = 1.13 \cdot 10^{-2}$ кг м², $J_Y = 4 \cdot 10^{-4}$ кг м², $f_\alpha = 0.004$ Н м с, $f_\beta = 0$, $f_\gamma = 0$.

Результати моделювання, подані на рис 2, свідчать про відповідність програмної моделі при гармонічній вібрації основи даним аналітичних розрахунків вібраційної похибки, яка може досягати значної величини (одиниць десятків градусів) в частотній області, яка близька до резонансної частоти маятникових коливань ЧЕ. Враховано також, що при роботі гіротеодоліта в реальних умовах експлуатації вихідний сигнал, який знімається у вигляді напруги на обмотках

датчика моменту компенсаційного зворотного зв'язку, пропускають через аперіодичний фільтр другого порядку з великою постійною часу:

$$W(p) = \frac{1}{(T_\phi p + 1)^2},$$

де постійна часу фільтра $T_\phi = 1..5$ с.

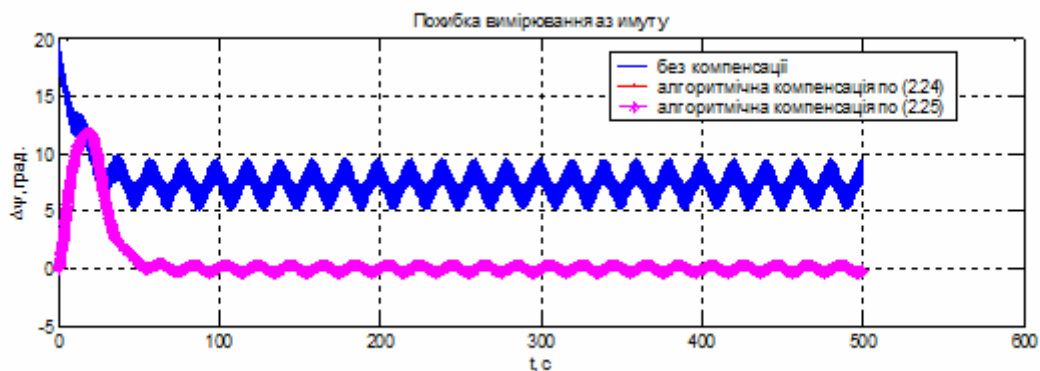


Рис. 2. Моделювання алгоритмічної компенсації при $\kappa = 100$.

Отже, розроблено і перевірено на адекватність комплекс комп'ютерних програмних засобів для моделювання руху чутливого елементу гіротеодоліту, який дозволяє враховувати вплив різного виду поступальної вібрації основи та особливості роботи приладу в компенсаційному режимі. Проведено моделювання (за створеним програмним комплексом) роботи приладу при гармонічно змінюваній та випадковій поступальній вібрації основи. Результати моделювання показали повну їх відповідність теоретично відомим особливостям руху гіротеодоліту за аналогічних умов. За допомогою програмного комп'ютерного моделювання доведено, що алгоритмічна компенсація є одним з ефективних і перспективних засобів підвищення точності ГТ за вібрації основи.

В третьому розділі розроблено методи визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу ГТ. В сучасних конструкціях гіротеодолітів і гірокомпасів зазвичай реалізується компенсаційний метод вимірювання, який передбачає вимірювання відхилення ЧЕ в азимуті з високою точністю. Для цього використовують фотоелектричні датчики кута автоколіматорного типу, які встановлюються на сліdkувальному корпусі і вісь чутливості яких спрямована вздовж нормалі до дзеркала, встановленого на ЧЕ. При повороті чутливого елемента навколо вертикальної осі на кут α на виході датчика виникає напруга, пропорційна куту відхилення, яка надходить до блоку керування, де формується сигнал зворотного зв'язку, що подається у вигляді напруги на датчик моменту. Якщо відомі значення залежності $\alpha(t)$ в моменти часу t_i , що знімаються на виході датчика кута, то можна визначити значення похідної функції $\dot{\alpha}(t)$ за відомою формулою:

$$\dot{\alpha}(t_i) = \frac{\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}.$$

На рис. 3 наведено результати моделювання компенсації похибки за даними чисельного диференціювання у порівнянні з компенсацією за точними значеннями $\dot{\alpha}(t)$ для випадків регулярної вібрації з амплітудою $n_m = 0.001$ і частотою $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$.

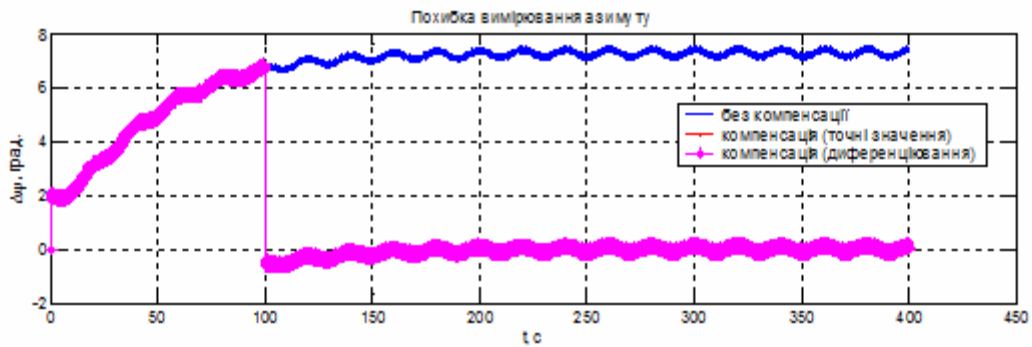


Рис. 3. Моделювання компенсації вібраційної похибки при диференціюванні сигналу датчика кута

Як видно з наведених результатів моделювання при гармонічній вібрації з амплітудою $n_m = 0.001$ і частотою $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$ середнє значення вібраційної похибки складає $\langle \alpha \rangle = 7.3^\circ$, після компенсації середнє значення залишкової похибки $\langle \alpha \rangle_K = 2.3'$, тобто вплив вібраційної похибки на точність ГТ зменшився приблизно на два порядки.

Розглянемо можливості визначення оцінки кутової швидкості чутливого елемента навколо вертикальної осі, шляхом синтезу спостережувача. В якості вимірюваної величини приймаємо кут α відхилення головної осі гіроскопа від нуля відлікової системи приладу. Обравши біноміальний розподіл коренів характеристичного рівняння, можна визначити коефіцієнти матриці **K** спостережувача:

$$k_1 = 4\omega_0 - \frac{(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y} - \frac{f_\beta}{J_z};$$

$$k_2 = 6\omega_0^2 - 4\omega_0 \frac{(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y} + \frac{(F_{KC} + f_\alpha)^2}{J_y^2} - \frac{4\omega_0 f_\beta}{J_z} + \frac{f_\beta^2}{J_z^2} + \frac{(F_{KC} + f_\alpha)f_\beta}{J_y J_z} -$$

$$- \frac{mgl}{J_z} - \frac{k_\alpha}{J_y} - \frac{H^2}{J_y J_z}$$

$$k_3 = -6\omega_0^2 \frac{J_y}{H} + 4\omega_0 \frac{f_\beta J_y}{J_z H} + \omega_0^4 \frac{J_y}{H \cdot mgl} + \frac{H}{J_z} - \frac{J_y f_\beta^2}{J_z^2 H} + \frac{J_y mgl}{J_z H};$$

$$k_4 = 6\omega_0^2 \frac{f_\beta J_y}{H} + 4\omega_0 \left(H + \frac{J_y mgl}{H} - \frac{J_y f_\beta^2}{J_z H} \right) - 4\omega_0^3 \frac{J_y}{H} - \frac{2f_\beta H}{J_z} + \frac{J_y f_\beta^3}{J_z^2 H} - \frac{2J_y f_\beta mgl}{J_z H} - \frac{H(F_{KC} + f_\alpha)}{J_y}$$

Отримані вирази для коефіцієнтів спостережувача включають задані параметри об'єкта (гіротеодоліта), а також значення власної частоти спостережувача – ω_0 , яке, в загальному випадку, можна обирати довільно, але з врахуванням того, що величина ω_0 визначатиме точність і швидкодію спостережувача.

Синтез проведено для випадку відсутності зовнішніх збурень, проте гіротеодоліт перебуває під дією поступальних вібраційних перевантажень $n_X(t)$, $n_Z(t)$, тому спостережувач оцінюватиме змінні стану з деякою похибкою. Для аналізу похибок оцінювання розглянемо частотні характеристики об'єкта і спостережувача. На рис. 4 представлені графіки частотних характеристик гіротеодоліта і спостережувача побудовані для різних значень ω_0 при коефіцієнтах компенсаційного зв'язку κ рівних 0, 10, 100, 1000.

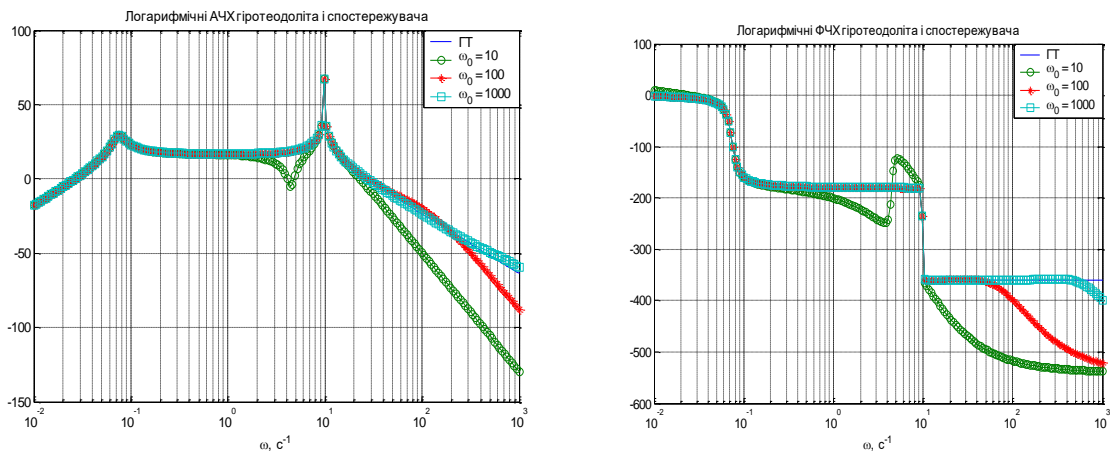


Рис. 4. Графіки частотних характеристик при $\kappa = 10$

З поданих графіків видно, що за малих значень коренів полінома спостережувача ($\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$) мають місце значні амплітудні і фазові спотворення оцінки кутової швидкості $\hat{\dot{\alpha}}$ відносно точного значення $\dot{\alpha}$, як в області низьких частот, так і в області високих частот. При збільшенні значення кореня до $\omega_0 = 100 \text{ c}^{-1}$ в області низьких частот амплітудних і фазових спотворень вже не спостерігається, а в області високих частот присутні спотворення по фазі і по амплітуді, починаючи з частоти $\omega = 50 \text{ c}^{-1}$. При $\omega_0 = 1000 \text{ c}^{-1}$ графіки АЧХ і ФЧХ гіротеодоліта і спостережувача практично збігаються до частоти $\omega = 500 \text{ c}^{-1}$.

Окрім визначення кутової швидкості повороту ЧЕ ГТ в азимуті $\dot{\alpha}(t)$, для застосування формул (13), (14) також необхідно визначити $\gamma(t)$ і $\dot{\gamma}(t)$. Безпосереднє вимірювання параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізованій площині є досить складною задачею і пов'язано зі значним ускладненням конструкції, оскільки

в цьому випадку необхідно встановлювати додатковий датчик кута. У той же час в існуючих конструкціях ГТ присутні системи стабілізації обертів гіромотора, інформація з яких може бути використана для визначення кута і кутової швидкості коливань ЧЕ відносно головної осі. В якості гіромотора (ГМ) в гіротеодолітах, як правило, використовується асинхронний двигун, швидкість обертання якого залежить від змінювання параметрів живлення і моменту тертя в опорах ротора. Для зменшення впливу флуктуацій кутової швидкості гіромотора на точність гіротеодоліта застосовуються спеціальні системи стабілізації.

Математичну модель коливань ЧЕ гіротеодоліта в негіростабілізованій площині можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} J_x \ddot{\gamma} + f_\gamma \dot{\gamma} + mgl\gamma = -\dot{H} + mgl \cdot n_Z(t) \\ T_{ГМ} \ddot{\omega} + T_{ГМ} \Delta\dot{\omega} + \Delta\omega = K_U \Delta U \end{cases}, \quad (15)$$

$$\Delta U = -W_{cc}(p)\Delta\omega, \quad W_{cc}(p) = \frac{K_{CC}(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)},$$

де J_x – момент інерції ЧЕ відносно головної осі, γ – кут повороту ЧЕ відносно корпусу навколо головної осі, f_γ – коефіцієнт в'язкого тертя, m – маса чутливого елемента; l – зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу, $H = J_p(\omega_0 + \Delta\omega)$ – кінетичний момент гіроскопа, J_p – осьовий момент інерції ротора ГМ, ω_0 – номінальна кутова швидкість ГМ, $\Delta\omega$ – зміна кутової швидкості ГМ, $T_{ГМ}$ – стала часу гіромотора, K_U – коефіцієнт передачі ГМ за напругою – коригувальна напруга, що надається до гіромотора, $W(p)$ – передатна функція системи стабілізації, K_{CC} – коефіцієнт передачі системи стабілізації, T_1, T_2 – сталі часу, $n_Z(t) = n_m \sin(\varepsilon + \psi_0) \sin \omega t$ – перевантаження точки підвісу ГТ.

За вимірювану величину прийнято сигнал $\Delta\omega$, що формується в системі стабілізації. Для оцінювання необхідних параметрів руху ЧЕ (γ , $\dot{\gamma}$) використовуватимемо матричне рівняння:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_H = (\mathbf{A}_H - \mathbf{K}_H \mathbf{C}_H) \hat{\mathbf{X}}_H + \mathbf{K}_H \mathbf{Y}_H, \quad (16)$$

де $\hat{\mathbf{X}}_H$ – вектор оцінок змінних стану, \mathbf{K}_H – матриця коефіцієнтів спостережувача:

$$\hat{\mathbf{X}}_H = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{x}_4 \quad \hat{x}_5]^T; \quad \mathbf{K}_H = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5]^T.$$

Коефіцієнти матриці \mathbf{K}_H оберемо за біноміальним розподілом:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A}_H + \mathbf{K}_H \mathbf{C}_H) = (p + \omega_H)^5.$$

Для моделювання оцінювання додаткових параметрів руху ЧЕ гіротеодоліта відповідно до математичної моделі (15) розроблено окрему програмну модель в середовищі MATLAB, в якій враховано отримані результати, що також є диференціальними залежностями, які необхідно інтегрувати разом з рівняннями (1)...(3). При моделюванні використано параметри приладу зазначені в попередніх розділах, а також параметри системи стабілізації обрані з відомих конструкцій ГТ: $T_{ГМ} = 32$ с, $T_1 = 0.5$ с, $T_2 = 0.01$ с, $K_U = 24$ с⁻¹/В, $K_{CC} = 50$ В/с⁻¹. Зовнішнє збурення $n_Z(t)$ задається у вигляді регулярної вібрації з частотою $\omega = 9$ с⁻¹ та амплітудою

перевантаження $n_m = 0.001$. При моделюванні випадкової вібрації використано залежності (10) та (11), які визначають кореляційну функцію та спектральну щільність перевантаження точки підвісу чутливого елементу гіротеодоліту $n(t)$, яку можна вважати стаціонарним випадковим процесом.

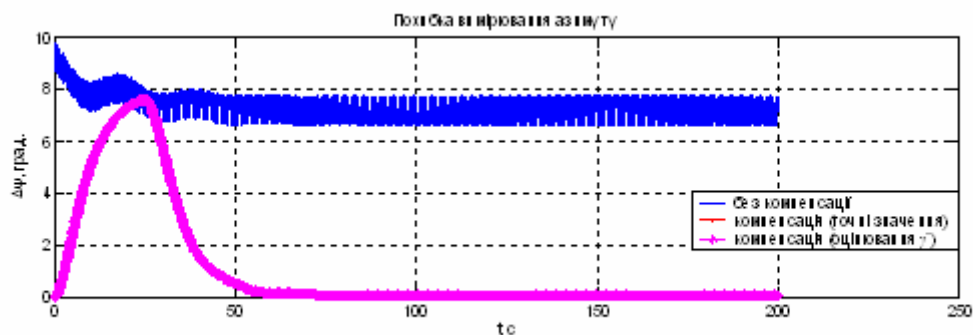


Рис. 5. Моделювання алгоритмічної компенсації з використання оцінок змінних $\hat{\alpha}(t)$ та $\hat{\gamma}(t)$ при регулярній вібрації

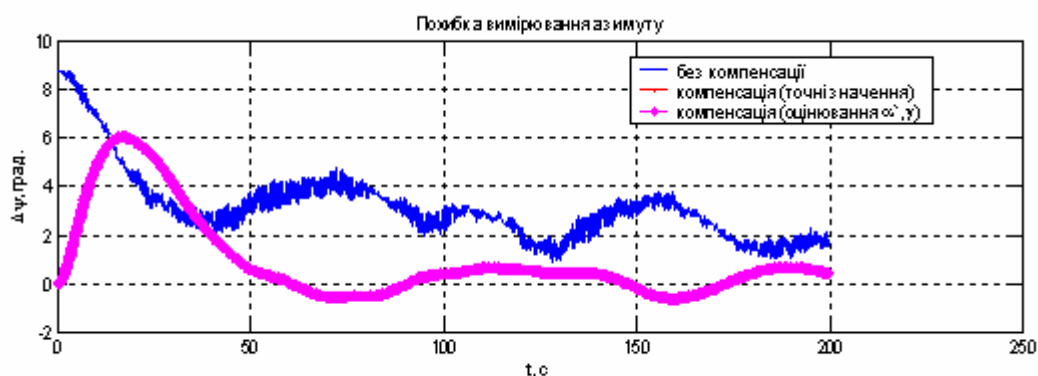


Рис. 6. Моделювання алгоритмічної компенсації з використання оцінок змінних $\hat{\alpha}(t)$ та $\hat{\gamma}(t)$ при випадковій вібрації

Як свідчать результати моделювання, подані на рис. 5, 6 при регулярній вібрації основи з заданими параметрами середнє значення вібраційної похибки сягає 7° . Алгоритмічна компенсація за формулою (13) дозволяє зменшити середнє значення похибки до рівня $5'$. При випадковій вібрації основи з заданими параметрами середнє значення вібраційної похибки досягає 3° . Алгоритмічна компенсація за формулою (13) дозволяє зменшити середнє значення похибки до рівня $15'$.

Наведені графічні залежності свідчать про те, що розроблені методи дозволяють отримати додаткову інформацію про рух чутливого елементу, використання якої для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки може підвищити точність приладу в умовах збурень основи. Відносні похибки оцінювання кутових параметрів $\hat{\alpha}$, $\hat{\gamma}$, $\hat{\dot{\gamma}}$ при раціональному виборі коефіцієнтів спостережувача складають не більше 5%, тому графіки вихідного сигналу ГТ з

компенсацією вібраційної похибки за точними значеннями і за оцінками в більшості випадків співпадають.

Отже, розроблено методи визначення кутової швидкості чутливого елемента в азимуті на основі чисельного диференціювання та оцінювання спостережувачем. Проведене моделювання показало високу точність визначення кутової швидкості $\dot{\alpha}$, що дозволяє використовувати отриману додаткову інформацію для задач компенсації вібраційної похибки. Проведено аналіз можливості визначення параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізованій площині γ та $\dot{\gamma}$, та розроблено метод оцінювання на основі інформації, що формується в системі стабілізації обертів гіромотора. Проведене моделювання компенсації вібраційної похибки за отриманою розширеною математичною моделлю показало, що використання інформаційної моделі, яка включає систему стабілізації обертів гіромотора, дозволяє зменшити вібраційну похибку шляхом її алгоритмічної компенсації.

В четвертому розділі розглянуто експериментальні дослідження роботи ГТ з алгоритмічною компенсацією вібраційної похибки. Для оцінки реальних значень вібраційної похибки можна запропонувати вимірювання прискорень за допомогою спеціальних датчиків, наприклад акселерометрів, та подальшу обробку отриманої інформації на основі імітаційного моделювання. Такий підхід дозволяє вирішити одразу декілька задач: з одного боку, визначити значення вібраційної похибки та перевірити достовірність отриманих теоретичних залежностей, а іншого, – є можливість перевірити розроблені методи алгоритмічної компенсації зазначеної похибки.

Для визначення віброприскорень в місцях встановлення приладів типу гірокомпас та гіртеодоліт, було проведено їх вимірювання за допомогою датчиків типу ДА-11. Вимірювання проводились в приміщеннях складального цеху, дослідної лабораторії та випробувального полігону (2 приміщення) КП СПБ "Арсенал". На основі проведених експериментів було отримано великий масив експериментальних даних, результати обробки якого наведено в роботі.

Безпосередній аналіз даних, отриманих з вимірювачів віброприскорень в часовій області ускладнений наявністю багатьох складових в записаному сигналі, тому для аналізу спектрів використано алгоритм швидкого перетворення Фур'є. В результаті отримано спектри сигналів вібраційних прискорень з 2-х ортогонально розташованих датчиків типу ДА-11, графіки яких, наприклад, наведені на рис. 7.

В спектрі віброприскорення, виміряного в приміщенні дослідної лабораторії (рис. 7), присутня низькочастотна складова на частоті близько 2 Гц, яка близька до однієї з власних частот коливань ЧЕ. Такий характер спектру можливо пов'язаний з коливаннями будівлі на одній з власних частот. Тому, у випадку встановлення ГТ в цьому приміщенні ймовірна поява значної вібраційної похибки.

Розглянемо вплив реальних даних прискорень на модель описану в розділі 2, тобто замість тестових моделей синусоїдального та випадкового сигналів подамо в розрахункову модель ГТ значення вібраційних прискорень, отримані в результаті експерименту. Частота дискретизації АЦП в процесі вимірювань складала 2000 Гц (період $T_0 = 0.0005$ с).

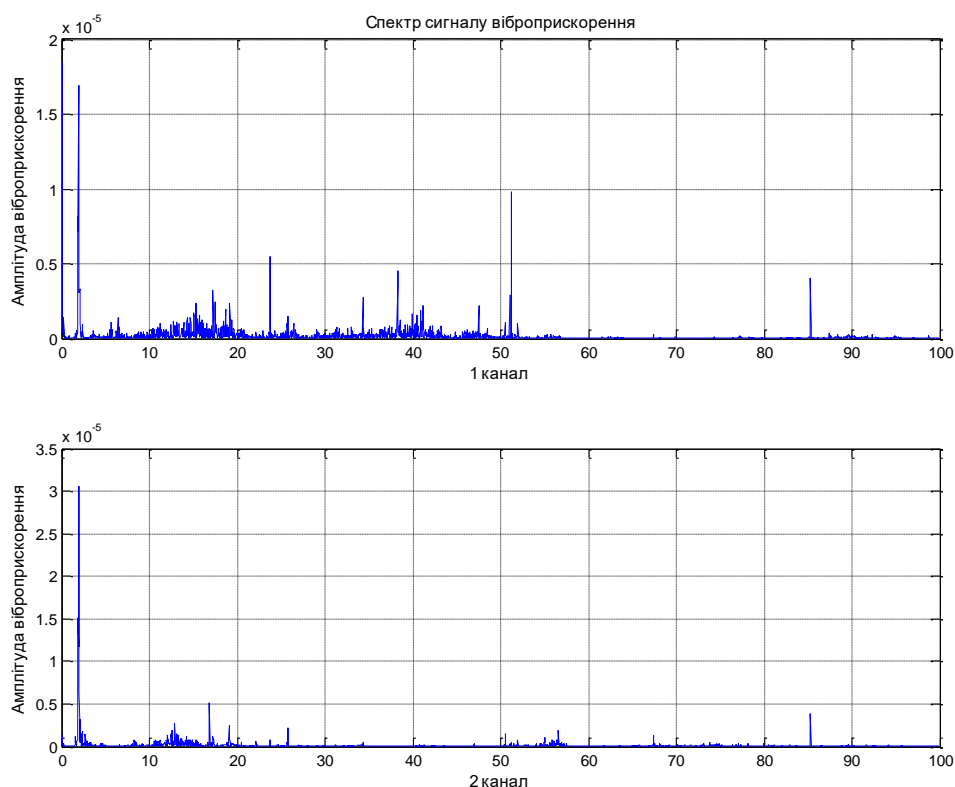


Рис. 7. Вимірювання вібраційного фону в приміщенні дослідної лабораторії на 4 поверсі будівлі ЦКБ

Для зменшення обсягу обчислень при моделюванні замість методу Рунге-Кутти 4 порядку інтегрування рівнянь моделі проводилось методом Хойне. Для імітаційного моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки обрано експериментальний сигнал, знятий у приміщенні дослідної лабораторії, спектр якого наведений на рис. 7.

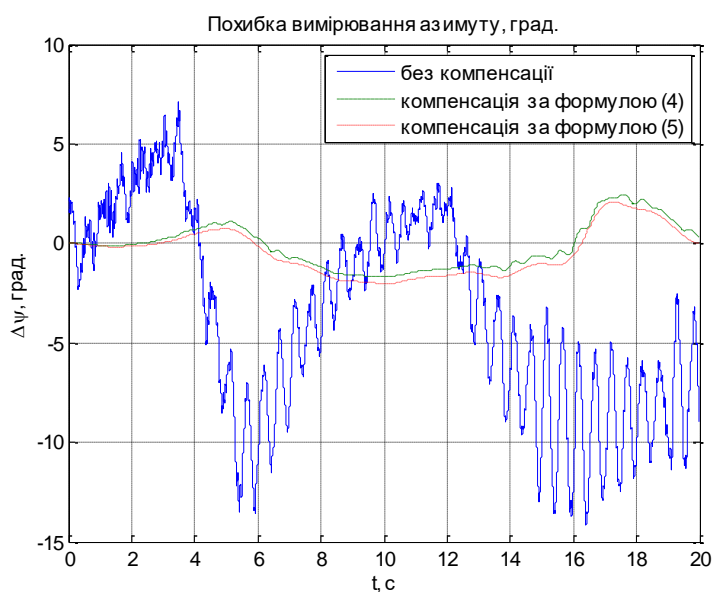


Рис. 8. Результати імітаційного моделювання

Як видно з графіка (рис. 8) частота вимушених коливань відповідає низькочастотній компоненті спектру вібрації основи близько 2 Гц. Середнє значення вібраційної похибки, отримане за результатами імітаційного моделювання, складає $\langle \alpha \rangle_m = -3.5266^\circ$. При моделюванні алгоритмічної компенсації вихідний сигнал пропускався через аперіодичний фільтр другого порядку з постійною часу $T_\phi = 2$ с. Середнє значення вібраційної похибки, після її компенсації складає в середньому 0.3214° , отже запропонований метод алгоритмічної компенсації дозволяє підвищити точність визначення азимуту гіротеодолітом за умови обмежено рухомій основі.

Розглянуто можливості застосування розроблених методів оцінювання параметрів кутового руху ЧЕ γ та $\dot{\gamma}$ на основі експериментальних сигналів, отриманих з блоку розгону та стабілізації обертів ГМ. В цьому випадку в матричному рівнянні оцінювання (16) вектор вимірювань Y складатиметься з одного сигналу – виміряної різниці фаз між f_{on} і $f_{\phi o}$, що приведена до зміни кутової швидкості обертання ГМ. Обчислення похибки проводилось на основі експериментальних даних, які були отримані на виході імпульсного частотнофазового дискримінатора. За отриманими даними проводилось оцінювання кутової швидкості $\dot{\gamma}$, та кута γ та обчислювалась вібраційна похибка, яка віднімалась від виміряного значення азимуту. Результати наведені на рис. 9.

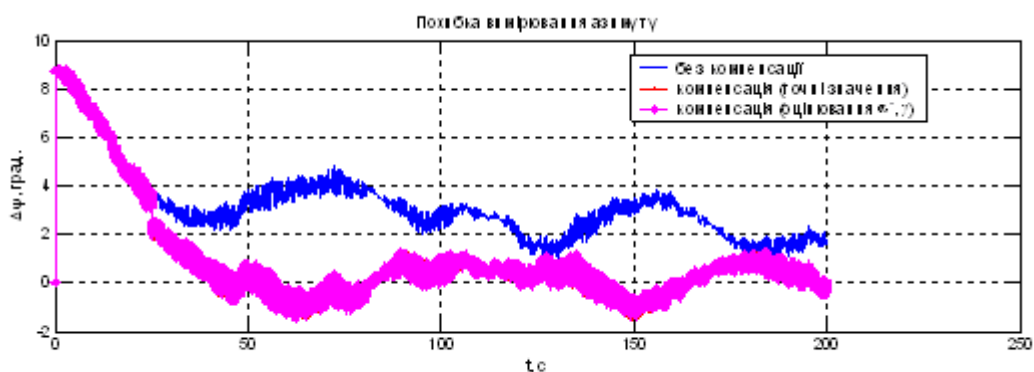


Рис. 9. Результати алгоритмічної компенсації за оцінками змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\alpha}(t)$

Як видно з рис. 9, оцінки додаткових параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту відповідають результатам моделювання, отже їх можна використовувати для підвищення точності гіротеодоліту, шляхом алгоритмічної компенсації вібраційної похибки

ВИСНОВКИ

Головний науковий результат роботи полягає в підвищенні точності гіротеодоліта в умовах обмежено рухомої основи, розробці та вдосконаленні комплексу методів визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу ГТ,

що дозволяють використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту

1. Розроблено і перевірено на адекватність комплекс комп'ютерних програмних засобів для моделювання руху чутливого елементу гіротеодоліту, який дозволяє враховувати вплив різного виду поступальної вібрації основи та особливості роботи приладу в компенсаційному режимі.

2. Проведено моделювання (за створеним програмним комплексом) роботи приладу при гармонічно змінюваній та випадковій поступальній вібрації основи. Результати моделювання показали повну їх відповідність теоретично відомим особливостям руху гіротеодоліту за аналогічних умов.

3. Запропоновано шляхи здійснення алгоритмічної компенсації вібраційної похибки ГТ. За допомогою програмного комп'ютерного моделювання доведено, що алгоритмічна компенсація є одним з ефективних і перспективних засобів підвищення точності ГТ за вібрації основи.

4. Розроблено методи визначення кутової швидкості чутливого елемента в азимуті на основі чисельного диференціювання та оцінювання спостережувачем. Проведене моделювання показало високу точність визначення кутової швидкості $\dot{\alpha}$, що дозволяє використовувати отриману додаткову інформацію для задач компенсації вібраційної похибки.

5. Проведено аналіз можливості визначення параметрів кутового руху ЧЕ ГТ в негіростабілізованій площині γ та $\dot{\gamma}$, та розроблено метод оцінювання на основі інформації, що формується в системі стабілізації обертів гіромотора.

6. Проведено моделювання компенсації вібраційної похибки за отриманою розширеною математичною моделлю. Відносні похибки оцінювання складають не більше 5%, тому інформаційна модель, що містить систему стабілізації обертів гіромотора, дозволяє зменшити вібраційну похибку шляхом її алгоритмічної компенсації.

7. Проведено експериментальні дослідження характеристик вібраційного фону в місцях встановлення приладів типу гіротеодоліт. Показано, що у спектрах вібраційних сигналів наявні низькочастотні складові, які можуть спричинити появу вібраційної похибки ГТ.

8. Проведено аналіз експериментальних сигналів, отриманих з блоку розгону та стабілізації обертів ГМ. Оцінки змінних $\hat{\gamma}(t)$ та $\hat{\dot{\gamma}}(t)$, отримані в результаті інтегрування рівняння оцінювання можуть бути застосовані для алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту.

9. Розроблені методи визначення параметрів руху чутливого елементу гіротеодоліту захищено патентами України на корисну модель. Результати досліджень були використані при випробуваннях гіротеодолітів в КП СПБ “Арсенал”. Теоретична частина результатів роботи також впроваджена в учбовому процесі кафедри приладів і систем орієнтації та навігації приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського для організації занять студентів з дисципліни “Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мураховский С.А. Динамика наземного компенсационного маятникового гирокомпаса / С.А. Мураховский, Ю.Ф. Лазарев, П.С. Мироненко // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – №2. – С. 125-130.

Здобувачем проаналізовано залежність вібраційної похибки від амплітуди та частоти вібрації, виконано моделювання динаміки чутливого елемента гірокомпаса.

2. Мураховский С.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.А. Хоца // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №1. – С. 151-156.

Здобувачем розроблено метод визначення кутової швидкості чутливого елемента гиротеодолита в азимуті на основі синтезу ідентифікатору стану.

3. Мураховский С.А. Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховський // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – №2. – С. 106-109.

Здобувачем розроблено метод визначення параметрів руху чутливого елемента гиротеодолита в негіростабілізованій площині на основі інформації з системи стабілізації обертів гіромотора, проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

4. Мураховський С.А. Визначення похибки гиротеодолита при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2013. - Вип.45 – С.24-30 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

Здобувачем проаналізовано вплив випадкової вібрації на вібраційну похибку гиротеодолита, отримано залежності похибки від зовнішніх та внутрішніх факторів.

5. Мироненко П.С. Оцінювання параметрів руху чутливого елемента гиротеодолиту з використанням фільтра Калмана / П. С. Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін, А. О. Боярчук. // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 129–133.

Здобувачем виконано синтез фільтра Калмана, проведено моделювання визначення оцінок параметрів руху чутливого елемента.

6. Мироненко П.С. Імітаційне моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гиротеодолиту / П. С. Мироненко, С. А. Мураховський, О. М. Сапегін // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2018. – №2. – С. 70–76 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO).

Здобувачем виконано імітаційне моделювання впливу поступальної вібрації на точність гиротеодолиту на основі експериментальних даних, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для використання методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

7. Патент на корисну модель 73373 Україна, МПК G01C 19/00 Гиротеодоліт / Мураховський С.А., Хоца А.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201201830; заявл. 17.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18/2012.

Здобувачем запропоновано метод визначення кутової швидкості чутливого елемента.

8. Патент на корисну модель 81188 Україна, МПК G01C 19/00 Гіротеодоліт / Мураховський С.А., Сапегін О.М.; заявники та патентовласники Мураховський С.А., Сапегін О.М. – № U 201214568; заявл. 19.12.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. №12/2013.

Здобувачем запропоновано метод визначення додаткових параметрів руху чутливого елемента.

9. Мураховський С.А. Наземный маятниковый гироскоп на ограниченно возмущаемом основании / С.А. Мураховский, О.Д. Чуракова, А.М. Шостак // Приладобудування - 2006: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2006. – С.42.

Здобувачем проведено моделювання динаміки наземного маятникового гірокомпаса компенсаційного типу при поступальній вібрації основи.

10. Мураховський С.А. Выбор параметров контура управления наземного маятникового гироскопа с магнитным подвесом чувствительного элемента / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2008: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано контур керування компенсаційним зворотним зв'язком в наземному гірокомпасі.

11. Мураховський С.А. Уменьшение влияния пространственной вибрации на точность наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2009: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2009. – С.22-23.

Здобувачем проаналізовано вплив просторової вібрації на точність маятникового гірокомпаса.

12. Лазарев Ю.Ф. Моделирование динамики наземного маятникового гироскопа / Ю.Ф. Лазарев, С.А. Мураховский // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті, економіці: міжнар. наук.-практ. конф. : Зб. матер. – Луганськ: ЛНУ ім. Тараса Шевченка, 2010. – С.51-52.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гірокомпаса при дії поступальної вібрації.

13. Мураховський С.А. Моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2010: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2010. – С.34-35.

Здобувачем проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

14. Мураховський С.А., Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента наземного маятникового гироскопа / С.А. Мураховский // Приладобудування - 2011: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – С.27.

Здобувачем проведено синтез спостережувача для визначення оцінки кутової швидкості чутливого елемента гіротеодоліта в азимуті.

15. Мураховський С.А. Метод визначення параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліту навколо головної осі / С.А. Мураховський, А.А. Хоца //

Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.24-25.

Здобувачем запропоновано метод визначення параметрів кутового руху чутливого елементу гіротеодоліта в негіростабілізованій площині.

16. Мураховський С.А. Визначення похибки гіротеодоліту при дії випадкової вібрації / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2012: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С.29-30.

Здобувачем проведено моделювання динаміки гіротеодоліта, що встановлено на основу, яка здійснює поступальну випадкову вібрацію.

17. Мураховський С.А. Використання фільтра Калмана в гіротеодоліті / С.А. Мураховський, О.М. Сапегін // Приладобудування - 2013: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С.29-30.

Здобувачем запропоновано використання фільтра Калмана для визначення оцінок кутового руху чутливого елементу гіротеодоліту.

18. Мураховський С.А. Метод измерения параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита / С.А. Мураховский, А.Н. Сапегин // Современные технологии в системах управления и вооружения: межд. науч.-техн. конф.: Сб. матер. – Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2013. – С.18-19.

Здобувачем запропоновано вибір параметрів ідентифікатора стану на основі аналізу частотних характеристик гіротеодоліту.

19. Мураховський С.А., Експериментальні дослідження методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки гіротеодоліту / С.А. Мураховський // Приладобудування - 2014: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф.: Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2014. – С.27-28.

Здобувачем проведено аналіз експериментальних даних для використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

АНОТАЦІЯ

Мураховський С. А. Алгоритмічні засоби підвищення точності гіротеодолітів на обмежено рухомій основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.03 «Гіроскопи та навігаційні системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Розвиток сучасних засобів наземної орієнтації потребує використання у своєму складі гіроскопічних компасів середньої та високої точності. Високі вимоги до гірокомпасів та гіротеодолітів, які використовуються в системах наземної орієнтації обумовлюють необхідність роботи приладу в умовах поступальної та кутової вібрації. В наш час актуальним є розробка нових та вдосконалення існуючих методів підвищення точності наземних гірокомпасів. Вирішення задачі підвищення точності можливе як конструктивними методами, так і за допомогою засобів математичної обробки інформації, яка видається приладом. Можливість

використання алгоритмічних засобів підвищення точності дозволяє значно зменшити витрати на розробку та виготовлення гірокомпасу, який здатний працювати в умовах збурень основи.

Проведено огляд сучасних засобів наземного орієнтування, що базуються на різноманітних принципах роботи. Розглянуто гіртеодоліти, створені на базі роторних гіроскопів, особливу увагу приділено приладам і системам вітчизняного виробництва. Проведено аналіз можливостей використання інерціальних навігаційних систем для визначення азимутів. Розглянуто гіроскопічні прилади, що комплексуються з супутниковими навігаційними системами та особливості їх використання при початковій виставці. Проведено аналіз методів підвищення точності гіроскопічних засобів наземної орієнтації та показано, що одним з актуальних шляхів підвищення точності гіртеодолітів є використання алгоритмічних методів підвищення точності.

Проведено аналіз математичної моделі руху чутливого елементу гіртеодоліту, розглянуто повні та прецесійні рівняння руху. Розроблено модель вихідного сигналу гіртеодоліту, який працює в компенсаційному режимі. Розроблено інформаційну модель гіртеодоліту на обмежено рухомій основі, яка включає динамічні рівняння руху чутливого елементу, зовнішні збурення, що діють на об'єкт дослідження, сигнали, які формуються в допоміжних системах керування, надлишкову інформацію, яка наявна в самому приладі. Розроблено комплекс програмних засобів в системі MATLAB та перевірено його адекватність відомим теоретичним залежностям.

Проведено аналіз впливу гармонічної вібрації на точність гіртеодоліту, отримано аналітичні залежності вібраційної похибки на основі частотних характеристик. Показано, що вібраційна похибка залежить від параметрів приладу; напрямку вібрації і положення головної осі гіроскопа відносно площини меридіану, амплітудно-частотних характеристик приладу, а також амплітуди і частоти перевантаження точки підвісу. Проведено аналіз впливу випадкової вібрації на точність гіртеодоліту, отримано аналітичні залежності вібраційної похибки на основі кореляційних функцій. Показано, що вібраційна похибка залежить від параметрів приладу; напрямку вібрації, динамічних характеристик приладу, а також дисперсії перевантаження і переважної частоти вібрації точки підвісу. Проведено аналіз шляхів підвищення точності гіртеодолітів при роботі на обмежено рухомій основі та запропоновано використання методу алгоритмічної компенсації вібраційної похибки. Проведено моделювання алгоритмічної компенсації на основі розробленої інформаційної моделі гіртеодоліта.

Розглянуто методи визначення додаткових параметрів руху чутливого елементу гіртеодоліту. Розроблено та промодельовано метод диференціювання сигналу датчику кута, в системі компенсаційного зворотного зв'язку. Проведено синтез спостережувача для визначення оцінки кутової швидкості чутливого елементу гіртеодоліту та обрано власні частоти спостережувача, які дозволяють зменшити похибки оцінювання з заданому частотному діапазоні. Проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки на основі визначеної кутової швидкості чутливого елементу в азимуті.

Розглянуто систему керування кутовою швидкістю обертання гіромотора. На основі математичної моделі руху чутливого елементу в негіростабілізованій площині розроблено метод оцінювання додаткових параметрів руху. Проведено моделювання та визначено похибки оцінювання. Розроблено розширену програмну модель гіротеодоліту та проведено моделювання алгоритмічної компенсації вібраційної похибки на основі визначених оцінок при гармонічній та випадковій вібрації основи.

Проведено визначення типових прискорень, що діють в місцях встановлення гіротеодолітів апаратно-програмним комплексом в складі трьох акселерометрів. На основі спектрального аналізу отриманих експериментальних даних показано, що в спектрі вібрації існують частоти близькі до резонансних частот коливань чутливого елементу. Проведено імітаційне моделювання впливу віброприскорень на точність гіротеодоліту.

Розглянуто конструктивну схему гіротеодоліту з компенсаційним методом вимірювання азимуту. Проаналізовано склад та характеристики системи стабілізації обертів гіромотору. Розглянуто вихідні сигнали системи стабілізації та проведено компенсацію вібраційної похибки на основі експериментальних даних.

Ключові слова: гіротеодоліт, наземний гірокомпас, поступальна вібрація, вібраційна похибка, алгоритмічна компенсація, ідентифікатор стану, імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Мураховский С. А. Алгоритмические средства повышения точности гироскопических компасов на ограниченно подвижном основании. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.03 — Гироскопы и навигационные системы. — Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2019.

Развитие современных средств наземной ориентации требует использования в своем составе гироскопических компасов средней и высокой точности. Высокие требования к гироскопам и гироскопическим компасам, которые используются в системах наземной ориентации, обуславливают необходимость работы прибора в условиях поступательной и угловой вибрации. В настоящее время актуальным является разработка новых и совершенствование существующих методов повышения точности наземных гироскопических компасов. Решение задачи повышения точности возможно как конструктивными методами, так и с помощью средств математической обработки информации, выдаваемой прибором. Возможность использования алгоритмических средств повышения точности позволяет значительно уменьшить затраты на разработку и изготовление гироскопического компаса, который способен работать в условиях возмущений основания.

Проведен обзор современных средств наземного ориентирования, основанных на различных принципах работы. Рассмотрены гироскопические компасы, созданные на базе роторных гироскопов, особое внимание уделено приборам и системам отечественного производства. Проведен анализ возможностей использования

инерциальных навигационных систем для определения азимутов. Рассмотрены гироскопические приборы, комплексированные со спутниковыми навигационными системами и особенности их использования при начальной выставке. Проведен анализ методов повышения точности гироскопических средств наземной ориентации и показано, что одним из актуальных путей повышения точности гиротеодолитов является использование алгоритмических методов повышения точности.

Проведен анализ математической модели движения чувствительного элемента гиротеодолита, рассмотрены полные и прецессионного уравнения движения. Разработана модель выходного сигнала гиротеодолита, который работает в компенсационном режиме. Разработана информационная модель гиротеодолита на ограниченно подвижном основании, которая включает динамические уравнения движения чувствительного элемента, внешние возмущения, действующие на объект исследования, сигналы, которые формируются во вспомогательных системах управления, избыточную информацию, которая имеется в самом приборе. Разработан комплекс программных средств в системе MATLAB и проверена его адекватность известным теоретическим зависимостям.

Проведен анализ влияния гармонической вибрации на точность гиротеодолита, получены аналитические зависимости вибрационной погрешности на основе частотных характеристик. Показано, что вибрационная погрешность зависит от параметров прибора; направления вибрации и положения главной оси гироскопа относительно плоскости меридиана, амплитудно-частотных характеристик прибора, а также амплитуды и частоты перегрузки точки подвеса. Проведен анализ влияния случайной вибрации на точность гиротеодолита, получены аналитические зависимости вибрационной погрешности на основе корреляционных функций. Показано, что вибрационная погрешность зависит от параметров прибора; направления вибрации, динамических характеристик прибора, а также дисперсии перегрузки и подавляющего частоты вибрации точки подвеса. Проведен анализ путей повышения точности гиротеодолита при работе на ограниченно подвижном основании и предложено использование метода алгоритмической компенсации вибрационной погрешности. Проведено моделирование алгоритмической компенсации на основе разработанной информационной модели гиротеодолита.

Рассмотрены методы определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита. Разработан и смоделирован метод дифференцирования сигнала датчика угла, в системе компенсационной обратной связи. Проведен синтез наблюдателя для определения оценки угловой скорости чувствительного элемента гиротеодолита и выбраны собственные частоты наблюдателя, которые позволяют уменьшить погрешности оценивания в заданном частотном диапазоне. Проведено моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности на основе определенной угловой скорости чувствительного элемента в азимуту.

Рассмотрена система управления угловой скоростью вращения гиromотора. На основе математической модели движения чувствительного элемента в негиростабилизированной плоскости разработан метод оценки дополнительных

параметров движения. Проведено моделирование и определены погрешности оценивания. Разработана расширенная программная модель гиротеодолита и проведено моделирование алгоритмической компенсации вибрационной погрешности на основе определенных оценок при гармонической и случайной вибрации основания.

Проведено определение типовых ускорений, действующих в местах установки гиротеодолита аппаратно-программным комплексом в составе трех акселерометров. На основе спектрального анализа полученных экспериментальных данных показано, что в спектре вибрации существуют частоты близкие к резонансным частотам колебаний чувствительного элемента. Проведено имитационное моделирование влияния виброускорений на точность гиротеодолита.

Рассмотрена конструктивная схема гиротеодолита с компенсационным методом измерения азимута. Проанализирован состав и характеристики системы стабилизации оборотов гиromотора. Рассмотрены выходные сигналы системы стабилизации и проведена компенсация вибрационной погрешности на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: гиротеодолит, наземный гирокомпас, поступательная вибрация, вибрационная погрешность, алгоритмическая компенсация, идентификатор состояния, имитационное моделирование.

SUMMARY

Murakhovskyy S. Algorithmic means for increasing the accuracy of gyrotheodolites on a limited mobile basis. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.11.03 "Gyroscopes and navigation systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2010.

In the dissertation the following scientific results were received:

1. The method for determining the parameters of motion of a sensitive element of a gyrotheodolite relative to the main axis - angle and angular velocity on the basis of information from the system of stabilization of the rotation of the gyromotor was first developed.

2. The method of determining the angular velocity of a sensitive element in the azimuth on the basis of the state identifier is developed, the necessary eigenfrequencies are determined on the basis of the analysis of the frequency characteristics of the system.

3. The method of algorithmic compensation of a vibration error due to the use of internal sources of information of the device is improved, and the efficiency of the developed methods under the action on the gyrotheodolite of the translational vibration, both deterministic and random, is shown.

The practical value of the results obtained is that on the basis of them it is possible to use land gyrocompasses and gyrotheodolites in conditions of a limited mobile basis, while the possibility of providing the necessary accuracy is possible. The developed methods for determining the parameters of the motion of a sensitive element of gyrotheodolite are protected by patents of Ukraine on the utility model.

The development of modern ground-based means requires the use of middle and high-accuracy gyroscopic compasses in its composition. High requirements for gyrocom-

passes and gyrotheodolites, which are used in ground-based systems, necessitate the device to operate in conditions of linear and angular vibration. In our time, the development of new and improving existing methods for improving the accuracy of ground gyrocompasses is relevant. The solution of the problem of increasing accuracy is possible both by constructive methods, and by means of mathematical processing of information, which is issued by the device. Possibility of using algorithmic means of increasing accuracy makes it possible to significantly reduce the costs of developing and manufacturing a gyrocompass, which is capable of operating under conditions of perturbation of the base.

An overview of ground orientation systems based on a variety of principles is conducted. The gyrotheodolites created on the basis of rotor gyroscopes are considered, special attention is paid to devices and systems of domestic production. The analysis of possibilities of use of inertial navigation systems for azimuth determination is carried out. Gyroscopic devices that are integrated with satellite navigation systems and features of their use at the initial exhibition are considered. The analysis of methods for increasing the accuracy of gyroscopic terrestrial orientation methods has been carried out and one of the topical ways to increase the accuracy of gyrotheodolites is the use of algorithmic methods for increasing accuracy.

An analysis of a mathematical model of the sensitive element was carried out, and it was clear that the precession and full equations. The model of the output signal to the gyrotheodolite, which is in practice in compensation mode, is broken down. An information model has been developed that includes the dynamic equations of motion of a sensitive element, external perturbations acting on the object of research, the signals generated in the auxiliary control systems, the excess information available in the device itself. The complex of software programs in the MATLAB system and the adequacy of the theoretical reservoirs has been broken down.

An analysis of the effect of harmonic vibration on the accuracy of gyrotheodolite has been obtained, analytical dependences of the vibration error on the basis of frequency characteristics have been obtained. It is shown that the vibration error depends on the parameters of the device; direction of vibration and position of the main axis of the gyroscope relative to the meridian plane, amplitude-frequency characteristics of the device, as well as the amplitude and frequency of the overload point of the suspension. An analysis of the influence of random vibration on the accuracy of gyrotheodolite was obtained, analytical dependences of the vibration error on the basis of correlation functions were obtained. It is shown that the vibration error depends on the parameters of the device; the direction of vibration, the dynamic characteristics of the device, as well as the variation of overload and the overwhelming frequency of the vibration of the suspension point. The analysis of ways to increase the accuracy of gyrotheodolites at work on a limitedly mobile basis is carried out and the use of the method of algorithmic compensation of vibrational error is proposed. The algorithmic compensation modeling is carried out on the basis of the developed information model of gyrotheodolite.

The methods of determination of additional parameters of motion of a sensitive element of gyrotheodolite are considered. The method of differentiating the signal of the angle sensor, in the compensation feedback system, is developed and simulated. The observed synthesis was carried out to determine the estimation of the angular velocity of the sensitive element of the gyrotheodolite, and the eugenic frequencies of the observed one

were chosen, which allow to reduce the estimation errors with a given frequency range. A simulation of algorithmic compensation of vibration error based on the determined angular velocity of a sensitive element in azimuth.

The system of control of the angular speed of the gyromotor is considered. On the basis of the mathematical model of motion of a sensitive element in a nongyrostabilized plane, a method for estimating additional parameters of motion is developed. The simulation was carried out and the estimation errors were determined. The expanded software model of gyrotheodolite was developed and algorithmic compensation of vibration error was simulated on the basis of definite estimates for harmonic and random vibration of the base.

The definition of typical accelerations in the places of installation of gyrotheodolite by hardware and software complex consisting of three accelerometers is carried out. On the basis of the spectral analysis of the experimental data obtained, it is shown that in the vibration spectrum there are frequencies close to the resonance frequencies of the oscillations of the sensitive element. Imitational simulation of vibration acceleration influence on accuracy of gyrotheodolite is carried out.

The constructive scheme of gyrotheodolite with compensating method of azimuth measurement is considered. The composition and characteristics of the stabilization system of the rotation of the gyromotor are analyzed. The output signals of the stabilization system are considered and compensation of the vibration error is made on the basis of experimental data.

Keywords: gyrotheodolite, land gyrocompass, linear vibration, vibrational error, algorithmic compensation, state identifier, imitational simulation.